

ELEMENTOS COMPÓSITOS EM BETÃO COM GEOMETRIA COMPLEXA POR PROCESSOS DE FABRICO AUTOMATIZADO



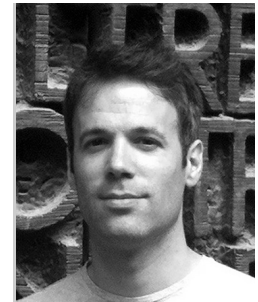
Pedro Carvalho

Aluno de Doutoramento
Faculdade de
Arquitetura da
Universidade do Porto
Porto
pcarvalho@arq.up.pt



Sandra Nunes

Professora Auxiliar
LABEST/FEUP
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Porto
Porto
snunes@fe.up.pt



José Pedro Sousa

Professor Auxiliar,
Coordenador do DFL
Faculdade de
Arquitetura da
Universidade do Porto
Porto
jsousa@arq.up.pt

SUMÁRIO

A integração emergente de tecnologias de fabricação automatizada na indústria da construção revela, no contexto atual, grandes potencialidades para a revisão dos processos construtivos tradicionais em betão, procurando suplantar de forma sustentada a normalização e repetição características da construção corrente em betão.

Fazendo parte de uma investigação alargada sobre processos de fabricação automatizada em betão, este artigo considera o estado de integração das tecnologias de fabrico aditivas e subtrativas em betão em obras contemporâneas, para focar dois problemas fundamentais: a produção de elementos em betão com **geometrias complexas** e a criação de **variabilidade material** funcional em elementos de betão.

Para o efeito é apresentada uma experiência prática que, convergindo estes dois interesses, investiga a viabilidade da criação de elementos com dupla curvatura e betonagens estratificadas com moldes em EPS, por processos de fabricação digital subtrativa.

Com o presente trabalho pretende-se demonstrar as possibilidades emergentes ao nível da produção de variabilidade formal e material em betão e apontar o interesse estético e funcional resultante, antevendo as possibilidades futuras para a sua aplicação na construção.

Palavras-chave: Betão, CAM, Fabrico Digital, Variabilidade.

1. DESAFIOS DA ARQUITETURA CONTEMPORÂNEA EM BETÃO: VARIAÇÃO FORMAL E MATERIAL

A inovação tecnológica tem sido um importante impulso para a arquitetura, sucessivamente dotando arquitetos e engenheiros de novas soluções para problemas existentes. Através deste processo evolutivo, os projetistas têm sido capazes de se libertar de constrangimentos construtivos para explorar novas possibilidades até então impossíveis ou impraticáveis de traduzir para a realidade.

Nas últimas décadas, a transição de tecnologias avançadas de desenho e fabricação digital (CAD/CAM) para a arquitetura tem estimulado o desenvolvimento de soluções arquitectónicas de grande complexidade, propondo a necessidade de um nível de customização fora das possibilidades da indústria tradicional.

Colocando neste âmbito a natureza material do betão, salientam-se duas características fundamentais neste material que sugerem importantes desafios e oportunidades para o seu desenvolvimento futuro: a sua plasticidade formal e a sua composição sintética como agregado de vários materiais.

Desta forma, no contexto atual, em que o desenvolvimento das tecnologias CAD/CAM proporcionam um novo nível de personalização consideramos que as duas características referidas representam os dois principais desafios para a arquitetura contemporânea em betão: a *variação formal* e a *variação material*.

1.1 Variação formal

A plasticidade do betão tem sido um tema fértil de exploração ao longo da sua história como material de construção, quer ao nível da definição de novas linguagens arquitectónicas, quer no sentido da exploração de formas construtivas complexas. Tal aspecto foi especialmente relevante durante a primeira metade do século XX, na construção de cascas de betão armado com geometrias regradas por arquitetos e engenheiros como Pier Luigi Nervi (1891-1979), Eduardo Torroja (1899-1961), e Felix Candela (1910-1997). Durante este período, a existência de uma mão-de-obra relativamente barata permitiu a construção dos sistemas de cofragem necessários para materializar este tipo de formas complexas em betão [1]. No entanto, nos anos seguintes, os crescentes custos da mão-de-obra, aliados à redução de custos possibilitada pela normalização de elementos de cofragem reduziu substancialmente a solicitação destas geometrias e provocou uma adoção generalizada de formas prismáticas na arquitetura em betão.

Atualmente, em parte pelo avanço das tecnologias de representação e modelação tridimensional, assiste-se na arquitetura ao ressurgimento de formas de elevada complexidade e irregularidade geométrica que sugerem novamente a utilização de betão na sua materialização. Esta tendência vai agora além das geometrias regradas e regulares, propondo superfícies matematicamente complexas e de difícil racionalização.

No panorama nacional, são ainda comuns, processos manuais para na criação de formas complexas em betão, nomeadamente a utilização de moldes em fibra de vidro ou polímeros líquidos, a partir de positivos com a forma pretendida. Estes processos pressupõem custos de mão de obra elevados e uma baixa capacidade de repetição, factores que impossibilitam a sua solicitação em cenários de personalização em grande escala, limitando consideravelmente o seu uso.

1.2 Variação material

Paralelamente, assiste-se hoje também a uma ávida exploração material sobre o betão, tendo em conta alterações aos seus principais elementos constituintes (matriz, agregados, reforço ou aditivos) para desenvolver novas capacidades de desempenho em vários níveis funcionais e estéticos. Desta forma, encontram-se hoje diversos tipos de betões com alterações ao seu desempenho tradicional em diferentes propriedades, especificamente pensadas no sentido de colmatar necessidades estruturais ou obter novas expressões estéticas. Desde as alterações mais comuns de resistência ou elasticidade a propriedades mais sofisticadas, como a sensibilidade à luz ou à humidade.

Independentemente das suas propriedades, este material é sistematicamente utilizado na construção de uma forma homogénea, ou seja, não existe variação das suas propriedades ao longo de um elemento construtivo. Este facto corresponde diretamente à cultura prevalente na engenharia e arquitetura, caracterizada pela discretização de funções entre diferentes elementos (ex: estrutura, isolamento e revestimento) que começa agora a ser colocada em causa.

Em oposição a esta lógica de materiais com composições uniformes e funções singulares, encontram-se, a partir da última década do século XX, materiais com propriedades distribuídas de forma não uniforme, intitulados *Functionally Graded Materials* (FGM). Estes materiais, embora desenvolvidos principalmente pela indústria aeronáutica [2], têm proporcionado nos últimos anos algumas abordagens ao tema da variabilidade material no âmbito da arquitetura e engenharia, principalmente através de conceitos de bio-mimetismo para optimização de estruturas. [3]

Com efeito, a natureza compósita do betão, denota uma fácil alteração das suas propriedades pela composição da sua mistura, colocando-o numa posição privilegiada para ser utilizado neste âmbito. Caso se desenvolva a capacidade de criar elementos de betão com propriedades materiais distribuídas heterogeneamente, poderão desenvolver-se novos paradigmas para a sua utilização na arquitetura e engenharia, possibilitando a introdução e modelação de várias funções em elementos únicos de betão.

Esta investigação representa uma primeira abordagem experimental à integração destes dois temas, explorando a possibilidade de utilizar tecnologias de desenho e manufatura digital (CAD/CAM) para fabricar elementos em betão de elevada complexidade formal, incorporando simultaneamente diferentes propriedades materiais.

2. PROCESSOS CAD/CAM NA VARIAÇÃO FORMAL EM BETÃO

Como primeira contextualização deste trabalho, é relevante expor sumariamente estado da arte das estratégias existentes para a produção de elementos com geometrias complexas em betão, recorrendo a tecnologias CAD/CAM.

Nas últimas décadas, o rápido desenvolvimento destas tecnologias levou ao desenvolvimento de várias soluções diferenciadas para este problema [4], correspondendo essencialmente a dois grupos principais, de acordo com os processos empregues.

2.1 Processos subtrativos para a produção de moldes.

A fabricação subtrativa pressupõe, a partir da informação contida num modelo tridimensional, a remoção sucessiva e controlada de camadas de material de um bloco inicial, por uma máquina de controlo numérico computadorizado (CNC). No âmbito da construção em betão, este processo é maioritariamente utilizado na produção customizada de moldes ou elementos de cofragem em madeira ou espumas sintéticas, aproveitando a liberdade geométrica e precisão inerentes ao processo.

Um exemplo recente pode ser encontrado na obra *Spencer Dock Bridge*, em Dublin, na Irlanda, construída em 2009. Neste caso, a variação formal proposta foi obtida pela utilização de um sistema de cofragem misto, com uma estrutura de madeira, preenchida por moldes em Poliestireno Expandido (EPS) de alta densidade. A dupla curvatura destes elementos realizou-se pela maquinação de uma fresadora de 5 eixos, sendo posteriormente revestidos com várias camadas de resina epoxi garantindo a qualidade do acabamento nas superfícies de betão [5], [6].

Por enquanto, o processo de fabricação subtrativa de moldes é a estratégia mais eficiente para a produção de elementos com geometrias complexas em betão, já adoptada na prática da construção em várias edificações. No entanto, mantém-se ainda como uma solução tecnológica de exceção.

2.2 Processos aditivos para a produção de elementos de betão.

A fabricação aditiva é um processo de criação de objetos a partir de informação de um modelo digital, por sucessiva deposição de camadas de matéria. Este processo, desenvolvido inicialmente para prototipagem em impressoras 3D, foi nos últimos anos transportado para a indústria da construção, substituindo-se os plásticos normalmente utilizados por vários tipos de argamassas de cimento desenvolvidas para o efeito.

Um exemplo relevante deste processo foi desenvolvido na Universidade de Loughborough por Richard Buswell, denominado por *Freeform Construction* [7]. Ainda em fase de desenvolvimento, esta tecnologia propõe a fabricação automatizada em grande escala (2mx2mx2m) de elementos maciços em betão pela extrusão vertical de uma argamassa em camadas sucessivas, controlada por um sistema CNC com 3 eixos.

A ausência de elementos de cofragem e a precisão do processo possibilitam a construção de elementos com uma grande complexidade geométrica, assim como uma total customização de cada peça produzida sem custos adicionais. Não obstante, encontram-se ainda algumas lacunas, nomeadamente ao nível das geometrias possíveis sendo por exemplo difícil a produção de formas com zonas em balanço sem suportes adicionais.

As estratégias aqui apresentadas para a produção customizada de geometrias complexas revelam também pistas para a introdução de variabilidade material em elementos de betão. A facilidade de produção de moldes complexos, assim como a possibilidade de impressão 3D em betão sugerem dois caminhos para obter níveis diferentes de variação material que irão ser introduzidos na secção seguinte.

3. VARIABILIDADE MATERIAL EM BETÃO

De acordo com uma análise da bibliografia e exemplos existentes, propomos a divisão das abordagens a este tema em dois tipos diferenciados de acordo com a sua natureza microscópica ou macroscópica: i. variabilidade contínua ou ii. estratificada.

3.1 Variabilidade contínua

Variabilidade material contínua, é a característica principal dos FGM, definidos por Wiscombe [2] como materiais cuja composição varia gradualmente ao longo de uma superfície, resultando em modificações correspondentes nas suas capacidades estruturais e propriedades visuais.

Neri Oxman [3] adaptou esta estratégia à produção de elementos de betão, através de um processo de impressão 3D intitulando-o de *Variable Density Concrete*. Neste caso, a variabilidade é introduzida ao nível da densidade da mistura, por adição de uma espuma de alumínio, propondo a optimização da utilização do material de acordo com cargas locais específicas.

3.2 Variabilidade estratificada

O conceito de variabilidade material estratificada parte do processo tradicional de cofragem de betão, potenciado pelas tecnologias de CAD/CAM na produção de moldes personalizados. A estratificação é uma solução macroscópica para obtenção de variabilidade material, pressupondo a diferenciação de propriedades num elemento de betão de uma forma localizada com limites definidos por camadas.

Nesta estratégia, diferentes zonas materiais podem corresponder a diferentes propriedades, modeladas de acordo com as necessidades específicas, variando por exemplo entre zonas interiores e exteriores (transversalmente) ou na extensão de uma superfície, vertical ou horizontalmente.

Aplicados à construção em betão, estes processos, podem resultar em profundas alterações

na forma como desenhamos e construímos, com efeitos tanto ao nível funcional como estético. Elementos de variabilidade estratificada ou contínua podem proporcionar a um nível funcional, por exemplo, diferentes graus locais de isolamento térmico ou acústico, assim como introduzir zonas de diferente rigidez ou densidade. A um nível estético, será possível explorar por exemplo texturas ou cores diferenciadas em fachadas tradicionalmente homogéneas.

4. PROTÓTIPOS EXPERIMENTAIS

Painéis com variação estratificada

Tendo em conta os processos identificados na secção 2 e os conceitos analisados na secção 3, propôs-se uma experiência de exploração de processos de fabrico subtrativo na materialização de elementos estratificados com geometrias complexas. Nas subsecções seguintes irão ser apresentadas as especificações relevantes a intenções e desenho, metodologia e resultados.

Como primeira abordagem aos conceitos aqui expostos, seguiu-se o intuito de integrar nesta investigação o desenho e a sua materialização, de modo a perceber as implicações práticas da utilização de ferramentas avançadas de desenho e fabricação (CAD-CAM). Entendeu-se portanto necessária a realização de um conjunto de protótipos que englobassem desde cedo uma componente funcional concreta e um desenho específico, para além de provetes de teste. Deste modo, propôs-se a concepção e produção de dois painéis com dupla curvatura com o objectivo de:

- i. Painel A - testar a complexidade geométrica possível com as técnicas propostas
- ii. Painel B – considerando a complexidade formal de A, testar a possibilidade de introduzir variabilidade material em elementos de betão, de forma estratificada.

4.1 Considerações formais

Tendo em conta as tecnologias descritas na secção 2, seleccionou-se para investigação, o processo subtrativo de fresagem CNC para a produção dos moldes necessários à betonagem das peças propostas. Sendo que cada processo de CAM assume um conjunto determinado de constrangimentos geométricos, é importante ilustrar estes limites no âmbito da produção de elementos arquitectónicos.

Neste sentido, os painéis foram desenhados no software de modelação 3D Rhinoceros, com um conjunto de ferramentas que permitiram testar a exequibilidade de formas complexas a vários níveis. Com dimensões gerais de 40x80cm, estes elementos são descritos por duas superfícies NURBS de dupla curvatura, não regrada, tornando impossível a sua descrição por métodos tradicionais de cofragem de madeira ou outra subdivisão sem recorrer a métodos de racionalização geométrica. (figura 1 - esquerda)

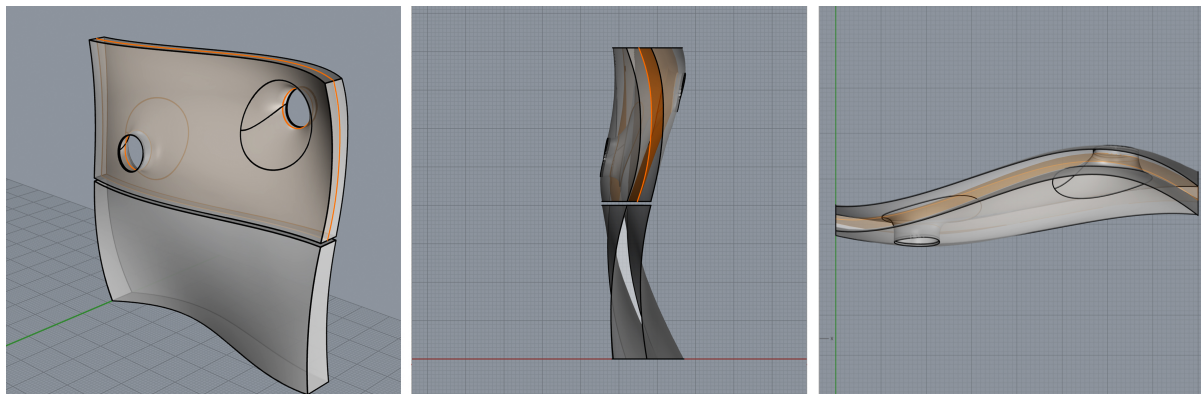


Figura 1. Modelo digital dos painéis A (baixo) e B (cima)

Além do problema de materialização de superfícies de dupla curvatura, incluiu-se uma variação da espessura geral dos painéis nos três eixos (entre 4,5cm e 8,5cm), não havendo paralelismo nas suas faces maiores.

No painel B introduziu-se uma separação ao longo da sua espessura, não paralela a nenhuma das faces, dividindo-o em duas camadas e criando a estratificação proposta. Foram ainda criados dois vazios - perfurações - circulares, desenhados como variações tangentes à superfície de cada face, resultando em duas formas afuniladas com direções opostas, como pode ser observado na *figura 1* (direita).

Finalmente, procurando testar a precisão da tecnologia de fabrico dos moldes, os painéis foram desenhados com uma geometria contínua entre eles, a partir de uma secção horizontal das superfícies originais.

4.2 Considerações materiais

4.2.1 Moldes

Tendo em conta as dimensões dos painéis, assim como a sua complexidade geométrica, os moldes foram fabricados a partir de blocos maciços de EPS com dimensões iniciais de 50x50x100cm. Dada a pressão prevista do betão sobre os moldes durante o processo de betonagem assim como as características materiais do betão e o processo de betonagem escolhido (vertical), ao contrário de outras experiências analisadas na literatura [8], optou-se por se utilizar uma estrutura de cofragem exterior, envolvendo o molde em EPS no seu interior. Desta forma foi possível garantir a ausência de deformações e a estanquidade necessária ao processo de betonagem.

Para se conseguir a geometria proposta para as peças, assim como a variação material do segundo painel, criaram-se cinco moldes diferenciados: dois para o primeiro painel e três para o segundo painel estratificado com perfurações.

Com base nos modelos digitais produzido, maquinaram-se os blocos de EPS com uma máquina de comando numérico computadorizado (CNC) de 3 eixos, com uma ferramenta final

de acabamento de 5mm de diâmetro, garantindo uma textura das superfícies consideravelmente lisa (*figura 2*), com apenas algumas zonas onde são perceptíveis as marcas do processo de maquinação.

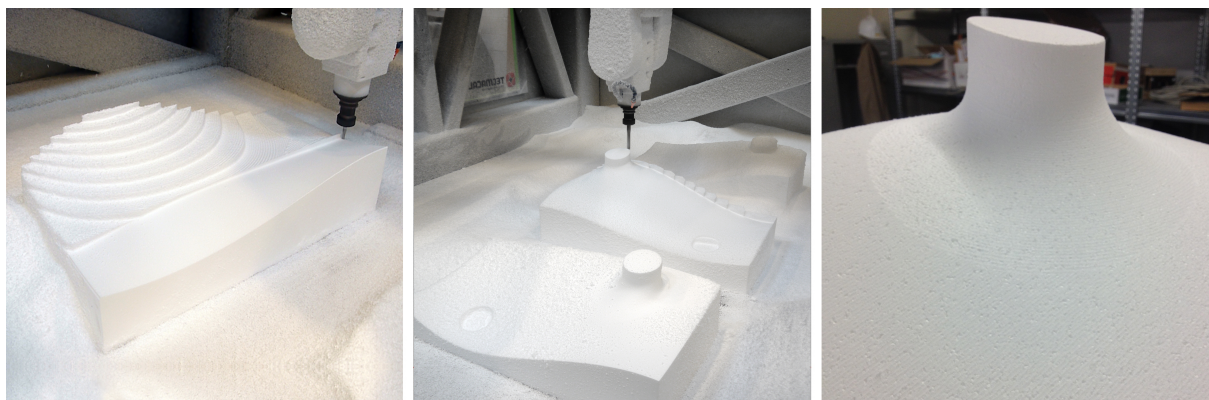


Figura 2. Processo de maquinação de moldes em EPS

4.2.2 Mistura

Na definição de uma mistura de betão para a realização dos dois painéis propostos, duas problemáticas foram tidas em conta em simultâneo, maioritariamente ligadas à espessura e geometria variável das peças. Em primeiro lugar, surge o problema da ausência de paralelismo entre as superfícies opostas dos painéis. Este facto demonstrou impraticável a realização de uma betonagem horizontal aberta, optando-se por uma betonagem vertical com um molde fechado. Em segundo lugar, a existência de elementos positivos no interior do molde, gerando zonas de difícil acesso.

Desta forma tornou-se imprescindível usar uma mistura de betão auto-compactável com agregados de pequenas dimensões e uma viscosidade adequada. Desta forma tornou-se possível o preenchimento completo do molde sem a necessidade de vibração, o que se demonstraria difícil pela dupla curvatura das peças em causa. Pelas mesmas razões, evitou-se realizar qualquer armadura metálica, recorrendo-se a um reforço com fibras de polipropileno.

Para esta experiência inicial, propôs-se uma variação material com um propósito meramente estético, realizada por alteração da tonalidade do betão, recorrendo à adição de cinzas volantes em substituição do fíler calcário numa das misturas.

4.3 Processo

Em ambos os painéis, após a maquinação dos moldes de EPS, estes foram fixados à estrutura de suporte e cobertos com uma camada de óleo descofrante, deixando o topo aberto para a betonagem vertical.

No caso do painel A, sem estratificação, seguiu-se uma betonagem simples, com um tempo de cura de 72 horas, e descofragem posterior. No caso do painel B, com estratificação, seguiu-se um processo iterativo por etapas. Após uma primeira betonagem seguiu-se uma cura de 24 horas, a descofragem de uma das secções dos moldes, a colocação e encaixe da nova secção, prosseguindo-se com uma nova betonagem com a segunda mistura auto-compactável, como ilustrado na *figura 3*. Neste painel foi crítico controlar os tempos de secagem para garantir uma boa adesão entre as camadas.

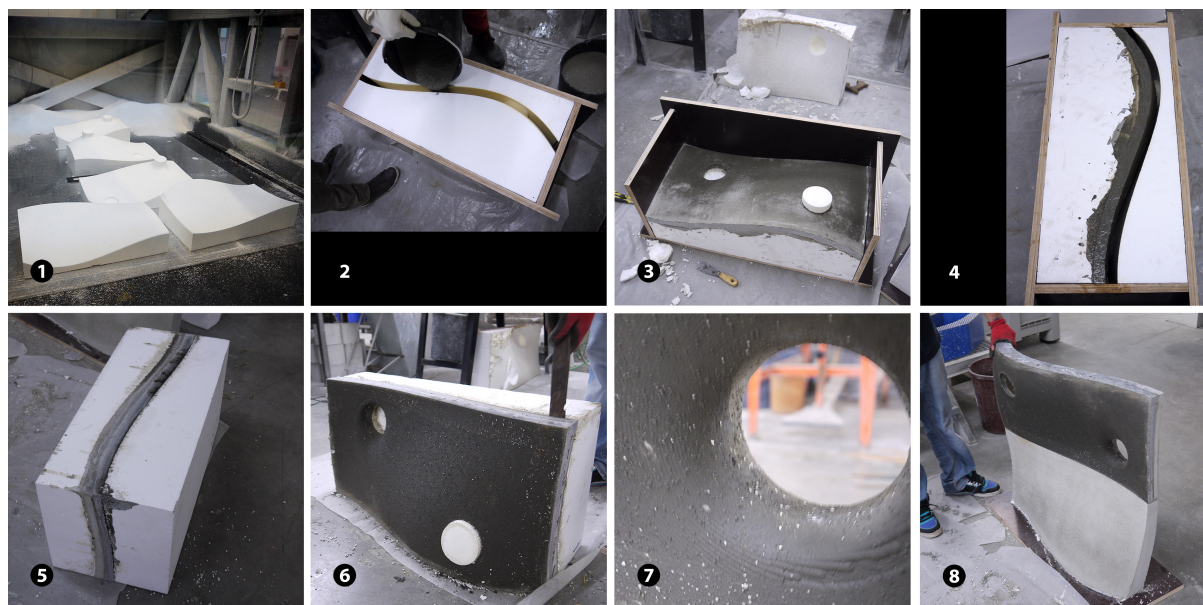


Figura 3. 1 - Moldes, 2 - Primeira betonagem, 3 - Descofragem, 4 - Montagem do segundo molde, 5 - Segunda cura, 6 - Descofragem, 7 - Detalhe da superfície, 8 - Painéis montados

5. DISCUSSÃO

As tecnologias de fabricação digital por subtração, utilizadas nas experiências mencionadas neste artigo, compreendem algumas oportunidades e limitações que foram revisitadas nesta experiência prática e recolocadas no contexto da estratificação material.

No âmbito da fabricação, foi possível perceber de forma muito clara a rapidez e precisão características a este processo, e a sua aplicabilidade à realização de elementos personalizados, executando com semelhante facilidade peças com um elevado grau de customização. Num processo relativamente rápido, foi permitindo incluir numa única peça de cofragem todos os encaixes e elementos necessários para a criação da geometria e vazios projetados.

Embora a liberdade geométrica deste processo seja elevada, os limites geométricos do processo aqui utilizado, nomeadamente, os 3 eixos de maquinaria utilizados, revelaram também o limite geométrico possível de materializar por este processo. Nomeadamente a direção em Z imposta pela ferramenta impediu a existência de zonas de sobreposição ou

escavação intermédia, obrigado, por exemplo, ao desenho dos elementos positivos em superfícies opostas dos moldes.

Embora as propriedades materiais da mistura auto-compactável utilizada, tenham possibilitado em grande parte a realização da geometria proposta, a sua utilização em moldes de EPS maquinado revelou algumas limitações do uso deste material enquanto molde, sem a utilização de outro sistema de acabamento. Neste sentido, a textura final das superfícies revelou alguma rugosidade proveniente da porosidade do molde.

Não obstante, foi também possível perceber na textura dos painéis, as marcas do processo de maquinação, transferidas pelo molde. Este aspecto, embora não explorado, revelou-se num elemento plasticamente interessante e possível de ser desenvolvido pelo controlo do processo de maquinação, na fase de desenho e preparação dos moldes.

Finalmente, esta experiência levantou também uma importante questão ao nível da sustentabilidade. A utilização de processos de fabricação subtrativa, em qualquer que seja o material de base, implicam a destruição de uma grande quantidade de material. Da fresagem dos blocos de EPS resultam grandes quantidades de micro-grânulos de EPS que são dificilmente recicláveis e os moldes em si, raramente são reutilizáveis, sendo danificados no processo de descofragem.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho procurou investigar um método de produção (em curso) de elementos em betão de geometria complexa e composição variável que possam corresponder a alguns dos interesses e desafios da arquitetura contemporânea. Para tal, propôs-se uma metodologia de realização de elementos estratificados com uma geometria complexa por processos de fabricação digital subtrativa, implicando betonagens iterativas para atingir um elemento final compósito, explorando os temas da variabilidade formal e material no betão.

A investigação envolveu a criação de dois protótipos sobre a forma de painéis com geometria complexa e, independentemente das limitações referidas, esta experiência demonstrou a possibilidade e viabilidade de introduzir uma componente de variabilidade material em elementos pré-fabricados em betão, independentemente do grau de complexidade da sua forma.

Esta experiência representou uma abordagem inicial ao tema da variabilidade por estratificação, abrindo novas perspectivas sobre as possibilidades de modelação das propriedades formais, estéticas e funcionais deste material a um nível macroscópico, através da sua aplicação de uma forma não homogénea.

Neste sentido, tendo em conta os resultados obtidos na experimentação prática e os conceitos propostos anteriormente, prevê-se no futuro a continuidade desta linha experimental, em duas fronteiras particulares: a exploração de outros materiais e processos para a fabricação de moldes, procurando otimizar a sua produção de uma forma rápida e

sustentável, assim como testar a possibilidade de criar elementos compósitos com variações de propriedades funcionais em betão, como por exemplo, a sua capacidade de isolamento térmico ou acústico.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho fez parte da investigação de doutoramento primeiro autor, na Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto. Está também integrado no projeto de investigação financiado por fundos do FEDER através do “Programa Operacional Factores de Competitividade” – COMPETE e pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, com a referência PTDC/ATP – AQI/5124/2012, intitulado “Tecnologia Robótica para um Projeto e Construção Não-Standard em Arquitetura”

Os autores gostariam ainda de agradecer ao Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural da faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e ao Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial pelo apoio na realização dos protótipos experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] Tullia, I; Poretti, S. - “Pier Luigi Nervi’s Works for the 1960 Rome Olympics” em *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Ed. Por S.Huerta, 2005.
- [2] Wiscombe, T. - “Beyond assemblies: system convergence and multi-materiality” em *Bioinspiration and Biomimetics*, 7 (1), 2012, p.015001.
- [3] Oxman, N. - “Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials” em *Journal of Architectural Design*, Vol. 80, N. 4, 2010, p. 78-85.
- [4] Martins, P. - “Digital fabrication technology in concrete architecture” em *Fusion, Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe*. Vol. 1, 2014, p. 475-484.
- [5] NEDCAM - “NEDCAM Shaping Technology”. Disponível em: www.nedcam.com (acedido a 20 de Setembro de 2014).
- [6] CORDEK - “Case Study: Spencer Dock Bridge Project”. Disponível em: www.cordek.com (acedido a 20 de Setembro de 2014).
- [7] Buswell et al. - “Developments in construction-scale additive manufacturing processes” em *Automation in Construction*, 21, 2012, p. 262-268.
- [8] Sheldon, D. - *Digital Surface Representation and Constructibility of Gehry’s Architecture*. Tese de doutoramento em Arquitectura, Design e Computação, Massachusetts Institute of Technology. 2002, p. 107-108.